

廃石膏としらすを活用した混合セメントの開発

前野 祐二 三原 めぐみ 池田 正利 福永 隆之

Development of the blended cement which made from Shirasu and gypsum which extracted from waste plasterboard

Yuji Maeno Megumi Mihara Masatoshi Ikeda Takayuki Fukunaga

Waste gypsum is discharged in large quantities from the Japan whole country. However, since hydrogen sulfide etc. may be waste charged, gypsum in plasterboard cannot be used for land reclamation easily. Then, the problem is that this research uses this waste gypsum effectively. The blended cement which can be manufactured only by mixing waste gypsum, cement, and Shirasu deposited on Kagoshima in large quantities to this effective use is developed. and It has the effect of suppressing the elution of fluorine. This paper clarifies the suitable mixed rate of three materials. Furthermore, the characteristic of the hydration reaction of the blended cement made as an experiment is clarified.

Keywords : Shirasu Gypsum Blended Cement Fluorine

1 はじめに

しらすは、天然のポゾラン質材料として、新しい混和材料としての活用が考えられている。しらすの主な構成物は、多くの火山ガラスと数種類の鉱物である。一方、一般的に使用されている混和材料はフライアッシュや高炉スラグ等がある。フライアッシュは結晶相とガラス相で構成され、結晶相に石英(SiO_2)、ムライト(一般式 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、石膏(CaSO_4)、マグネタイト(Fe_3O_4)、ヘマタイト(Fe_2O_3)などである。ポゾラン反応するのは主にガラス相である。一般的にフライアッシュには自硬性がないと言われ、ガラス相に含まれる SiO_2 が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ やアルカリとの共存下でポゾラン反応を生じる。このため、ポゾラン反応速度や水和生成物量にはガラス相の組成の影響が大きい。また、ガラス相中のアルミナ成分(Al_2O_3) はエトリンガイトやモノサルフェート、 C_4AH_x などのアルミネート系水和物の生成に寄与する¹⁾。高炉スラグは、 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO を主成分とする。また、高炉スラグを大量の水で急冷した水砕スラグは、結晶化されずにガラス質となる。高炉スラグは潜在的な水硬性があると言われ、ガラス構造体に CaO が含有しているため、 CaO と SiO_2 、 Al_2O_3 が水和反応により硬化が始まるというのが一般的

である²⁾。フライアッシュ、高炉スラグともに大きく硬化反応に影響しているのは結晶質ではなくガラス質である。そこで、火山ガラスを多く含むしらすを混和材料として活用することを研究した。しらす、セメントに、廃石膏として排出されている石膏ボードから得られる廃石膏や、土壌の地盤改良や土壌中和剤かつカルシウム補給などに用いられる消石灰を混合した混合セメントで硬化体を作製し、この硬化体の強度特性、硬化特性を明らかにした。

2 しらすと廃石膏について

表1 しらすの化学組成(重量%)

| | SiO_2 | Al_2O_3 | K_2O | Fe_2O_3 | CaO | SO_3 |
|-------|--|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|---------------|
| しらす A | 69.4 | 20.7 | 1.45 | 5.81 | 1.22 | 0.188 |
| しらす B | 74.1 | 17.6 | 2.34 | 3.91 | 1.24 | 0.02 |
| しらす C | 81.3 | 11.2 | 2.85 | 1.92 | 1.66 | 0.079 |
| しらす D | 76.9 | 12.9 | 1.89 | 4.55 | 1.3 | 1.26 |
| しらす E | 81.6 | 10.6 | 3.47 | 2.23 | 1.6 | 0.02 |
| しらす F | 81.7 | 10.4 | 3.41 | 2.29 | 1.6 | 0.03 |
| 廃石膏 | 1.48 | — | 0.039 | — | 77.9 | 20.2 |
| しらす A | 加久藤火砕流の堆積物 溝辺町のしらす(入戸火砕流) 吉田町の水成しらす(入戸火砕流) 吉田町の水成しらすの風化したしらす 川辺町のしらす(入戸火砕流) 東串良町のしらす(入戸火砕流) | | | | | |
| しらす B | | | | | | |
| しらす C | | | | | | |
| しらす D | | | | | | |
| しらす E | | | | | | |
| しらす F | | | | | | |

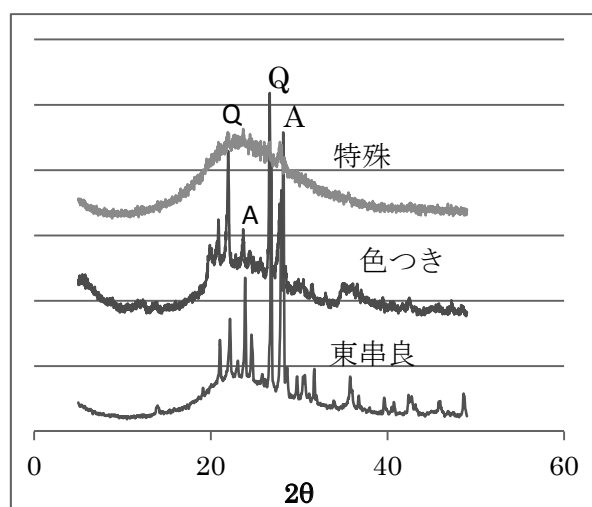


図1 しらすのX線回折パターン
Q:Quartz A:Anorthite

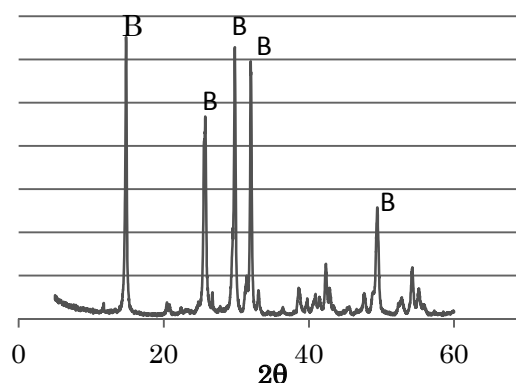


図3 廃石膏のX線回折図
B:Bassanite

串良しらすは、これらの結晶質の鉱物をはっきりと定性することができた。それに対し特殊しらすは、X線回折のピークが現れず、なだらかな曲線を描くような回折図となった。これは、結晶質が少なくガラス質に富んでいることに起因すると思われる。ガラス質に富んでいるということはそれだけポゾラン活性も大きいと考えられる。次に、粒度分布比較表を示す。図2は東串良しらす、特殊しらす、川辺しらすの粒度分布を表したものである。東串良の平均粒径は東串良しらすが $327.6\mu\text{m}$ であった。それに対し特殊しらすは平均粒径 $23.9\mu\text{m}$ と非常に細かい粒子で構成されていた。粒子が細かいということは比表面積が大きくなり、反応性が良くなることが期待できる。以上のことから今回の実験ではガラス質に富み、粒子の細かい特殊しらすを主に用い、色つきしらすは特殊しらすよりアルミナ成分や硫黄成分が多いことからそれらの補給の為に添加するような形で用いることにした。

2.3 廃石膏について

廃石膏のX線回折図を図3に示す。廃石膏の主な鉱物組成は $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (半水石膏)である。半水石膏が水と化学反応することで Gypsum : 二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)となる。廃石膏はセメントの凝結を制御する目的とエトリンサイト生成のために使用した。

混合セメントの試作

表2は特殊しらす、廃石膏とセメントを混合した混合セメント作製するときの混合割合を示す。作製した硬化体は気中養生とし、材齢毎(3日、7日、28日)に

表2 混合セメント配合表(%)

| | 特殊しらす | OPC | 分散剤 | W/C(%) |
|------|-------|-----|-----|--------|
| No.1 | 50 | 50 | 0.5 | 50 |
| No.2 | 60 | 40 | 0.6 | 50 |
| No.3 | 70 | 30 | 0.7 | 50 |
| No.4 | 80 | 20 | 0.8 | 50 |
| No.5 | 90 | 10 | 0.9 | 50 |
| Opc | 0 | 100 | 0 | 50 |

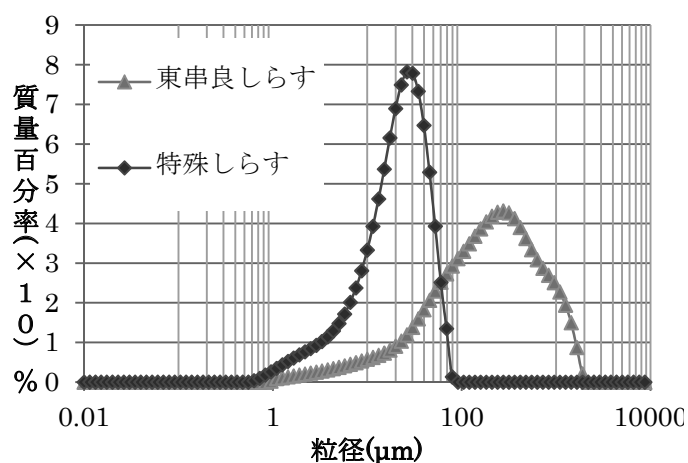


図2 しらすの粒度分布

南九州にしらすは、広く堆積している。その多くは入戸火砕流が堆積したしらすだが、多い。その他に加久藤火砕流、鬼界カルデラから噴出火砕流等がある。本試験で用いたしらすは、鹿児島市東佐多町の山道で採取したしらす(以下特殊しらす)と、色の濃いしらすD(以下色つきしらす)を使用した。消石灰は農業用に市販で販売されているものを使用し、廃石膏は廃棄された石膏ボードを微粉碎したものを使用した。表1に主な化学組成を示す。また、特殊しらす、色つきしらすと東串良しらす(しらすF)のX線回折パターンを図1に示す。表1で示したようにしらすは、採取した地域で化学組成に多少の差があり、風化することにより SiO_2 が減少し、 Al_2O_3 が相対的な割合が増加するようである。同様に鉱物組成にも採取地域で違いが見られた。しらすの主な鉱物組成は SiO_2 (クォーツ)と $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (アノーサイト)である。色つきしらすと東

圧縮強度を計測した。また、圧縮強度に関しては JIS R 5201 に準じて行った。また、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。以後普通ポルトランドセメントは OPC と略記する。混練直後、材齢 1 日、材齢 3 日、材齢 7 日で X 線回折による測定を行った。なお、養生室での気中養生とした。

図 3 に表 2 の混合割合で作製した混合セメントで作製した硬化体の圧縮強度を示す。密度は No.1 が 1.7g/cm^3 程度で、No.5 では 1.5 g/cm^3 となり、かなり軽いことが分かる。しらすの混合割合が 50,60% のときの圧縮強度は、材齢 7 日では、OPC だけとほとんど変わらないが、28 日養生では、約半分程度となった。しらすの混合割合が 70% 以上では、強度は、材齢 7 日でも強度は OPC と比較すると小さく、混合割合が多いほど強度は小さい。材齢 28 日の圧縮強度は、いずれの供試体でも強度は増加しているが、OPC の強度と比較するとかなり、小さい。最もしらす混合割合が多い No.5 (OPC : しらす=10 : 90) は、材齢 28 日強度が 2.82 N/mm^2 であり、強度が小さいことが分かる。

図 5 から図 8 までに No.1~No.5 の練混ぜ直後から材

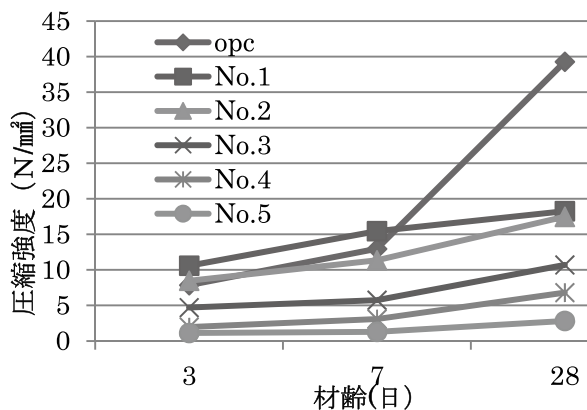


図 4 混合セメント硬化体の圧縮強度

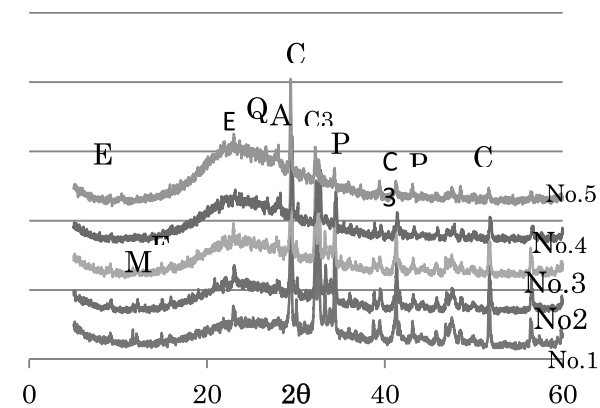


図 5 混合セメント混練直後の X 線回折パターン

齢 28 日までの X 線回折パターンを示す。図に示すように No.5 は最も特殊シラスが多いため $2\theta = 23^\circ$ 付近を頂点としたブロードなハローが最も高いことが分かる。そして、アノーサイト(A)、クォーツ(Q)のピークがある。また、カルシウムシリケート水和物(CSH)が生成されていることが分かる。また、No.1 と No.2 の供試体には、モノサルフェート(M)が生成されていることが特徴的である。石膏が消費されると、エトリンガイトがモノサルフェート化されると記載されている³⁾。石膏量が少ないのでモノサルフェートが生成されると考えるべきである。

図 5 に示すように主な鉱物組成として、 $2\theta = 32.2^\circ$, 34.4° , 51.6° のピークが検出され、 C_3S と定性した。また、 $2\theta = 32.2^\circ$, 34.4° には C_2S も同様に定性できた。No.4 はしらすの鉱物であるアノーサイトも $2\theta = 27.7^\circ$ で若干定性できた。 $2\theta = 18.1^\circ$, 34.2° のピークが検出されていることから、 C_3S , C_2S の水和の際に析出する CSH(ケイ酸カルシウム水和物)と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ポルトランドイト)も生成していると考察で

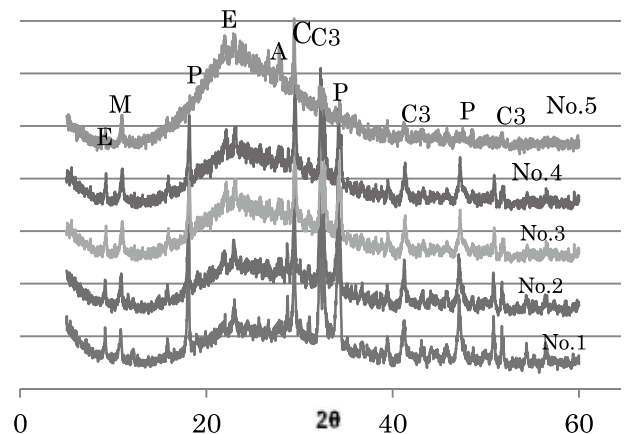


図 6 材齢 1 日 X 線回折パターン

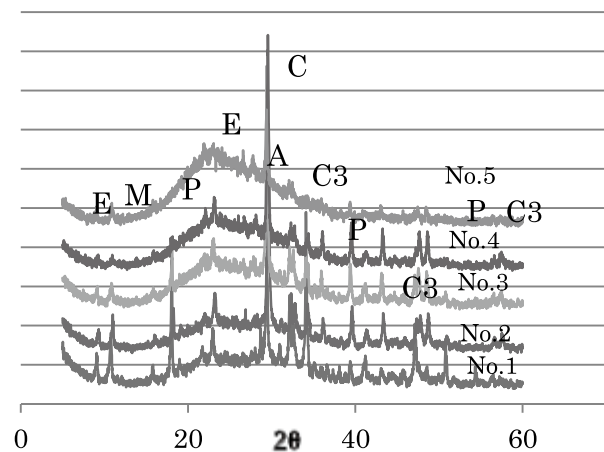


図 7 材齢 3 日 X 線回折パターン

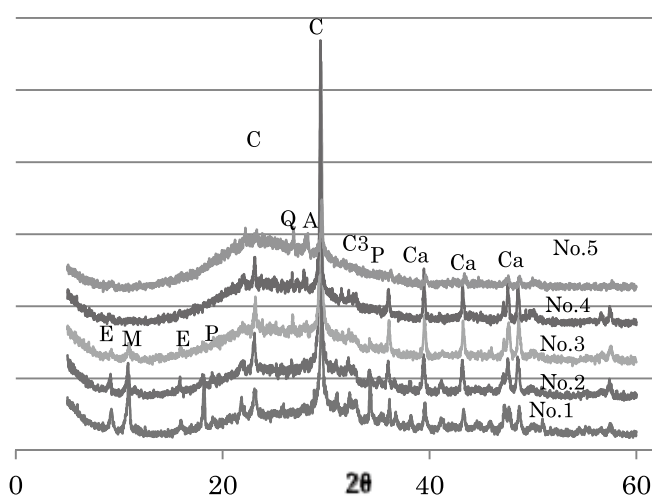
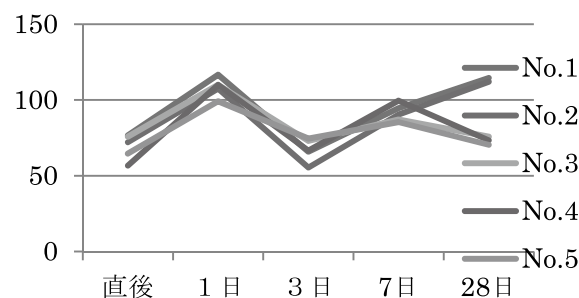
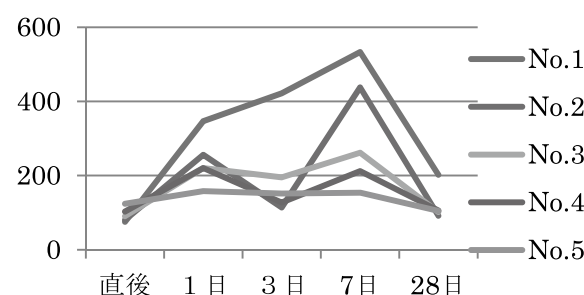
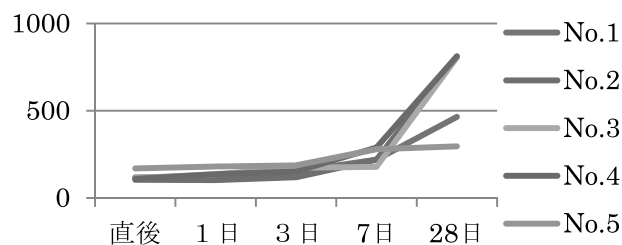


図8 材齢28日X線回折パターン

きる。また、図中のCはCSH、C3は C_3S 、Pは $Ca(OH)_2$ 、Aはアノーサイトを示している。 $2\theta = 23^\circ$ 付近のブロードな凸部はNo5が最も値は大きく、No1が最も低い値となっている。これはしらすの混合量が多いほど値が高い。すなわち、非結晶のシリカが多いほど高いと考えることができる。 $Ca(OH)_2$ は、No5では低い値であるが、No4が最も高い値となっている。

図6に混合セメント硬化体の材齢1日のX線回折パターンを示す。混練直後と比較すると、 $2\theta = 32.2^\circ$ 、 34.4° 、 51.6° にピークが検出され定性した C_3S が減少し、 $2\theta = 29^\circ$ に検出されるピークからCSHを定性した。CSHは、 C_3S の水和により生成される。No.1はセメント量が最も多く $Ca(OH)_2$ の生成量が最も多くなるはずであるが、セメント量の少ないNo.2の方が $Ca(OH)_2$ のピーク値が高い。一方CSHのピーク値はNo.1の方が高い。これは C_3S が SiO_2 と水和してCSHの生成量が多くなったと考えることができる。No.1、No.2には微量ながら $2\theta = 9.1^\circ$ にピークが検出され、エトリンガイトが定性できた。表1より、特殊しらすには若干ながら SO_3 が存在しているため、その硫黄成分と特殊しらす中のアルミナ成分、セメント中のカルシウム成分が反応し生成されたと推定できる。また図中のEはエトリンガイトを示している。

図7に混合セメント硬化体の材齢3日のX線回折パターンを示す。継続的に C_3S 、 C_2S が水和し $Ca(OH)_2$ が析出されていることがグラフより読み取れる。一方CSHのピーク値は養生1日と比べるとピーク値は小さくなっている。これは、CSHが $Ca(OH)_2$ とゲル化した SiO_2 に分解したと考えられる。そのため、さらに

図9 $2\theta = 9.1$ のピーク値の推移図10 $2\theta = 18.12$ のピーク値の推移図11 $2\theta = 29.1$ のピーク値の推移

$Ca(OH)_2$ のピーク値は高くなったと推察できる。エトリンガイトも継続的に生成されている。No.1、No.2では $2\theta = 9.9^\circ$ 、 31.1° にはモノサルフェートを定性することができた。モノサルフェートがNo.2とNo.1に生成されるが、No.3~No.5では生成されていない。石膏が消費されると、エトリンガイトがモノサルフェート化されると記載されている³⁾。石膏量が少ないのでモノサルフェートが生成されたと考えるべきである。

図8に混合セメント硬化体の材齢28日のX線回折パターンを示す。材齢3日と比較すると、No.2~No.5は $2\theta = 29.1^\circ$ にピークが検出でき、 $CaCO_3$ (カルサイトCa)と定性した。CSHが空気中の CO_2 と反応し、 $CaCO_3$ が生成したと推定できる。図中のCaは $CaCO_3$ を示している。

次にこのX線回折パターンを 2θ 毎に整理した。

図9に $2\theta=9.1^\circ$ のピーク値(エトリンガイトを示す)の推移を示す。

図に示すように直後から7日までは、同じ傾向を示すが、28日でNo1とNo2のピーク値は増加している。また、No3,4,5はピーク値逆に減少している。

図10に $2\theta=18.12^\circ$ のピーク値(Ca(OH)_2)の推移を示す。

図中のNo2の3日の値が急激に減少しているがほぼ他は同じパターンを示す。すなわち、材齢7日までは値は増加するが、その値はNo.1が最も大きくNo.5が最も小さい。また、材齢28日ではそのピーク値はいずれ日までは、 Ca(OH)_2 が生成されていたが、その後はその反応が少なくなったことを示す。

図11に $2\theta=29.1^\circ$ のピーク値(カルサイト)の推移を示す。図に示すように材齢日数7日までは、ほとんど増加しないが、7日～8日に急激に増加する。れも減少する。これは、OPCが水和反応して小林、宇野は空隙の増大が炭酸化を促進することを明らかにしている⁴⁾

1968年に九州工業技術試験所の松田、山田⁵⁾が、消石灰 Ca(OH)_2 の炭酸化速度に及ぼす共存水分ならびに雰囲気相対湿度(以下、RHと略す)の影響に関する報告をしている。これによれば、共存水分が低い(3%)場合、雰囲気相対湿度が炭酸化速度に影響し、RH = 100%では80%に比べて速度が倍増し、2gの消石灰が7日でほぼ100%炭酸化し、更にこのRH = 100%の条件下で消石灰に水を添加すると速が増加し、水分量25%近傍で最も炭酸化が速く、反応完了が7日から3日にまで短縮する、20%の水分量を含む Ca(OH)_2 が、約120分で約8割が炭酸化することを示している⁶⁾。

表3 廃石膏を混合した場合の混合割合(%)

| | 特殊しらす | OPC | 廃石膏 | W/C(%) |
|-------|-------|------|-----|--------|
| No.6 | 47.5 | 47.5 | 5 | 50 |
| No.7 | 57 | 38 | 5 | 50 |
| No.8 | 66.5 | 28.5 | 5 | 50 |
| No.9 | 76 | 19 | 5 | 50 |
| No.10 | 85.5 | 9.5 | 5 | 50 |

これらの文献から推察すると、本実験の供試体は、養生室に気中で静置していたので急激な炭酸化の可能性が高い。

Ca(OH)_2 の密度は 2.21 g/cm^3 、 CaCO_3 の密度は、 2.71 g/cm^3 であり、一般に密な状態になるといわれている。

Ca(OH)_2 は CaCO_3 に炭酸化することにより、約11.7%体積が増加することで空隙率が減少することになることを示している⁷⁾。

廃石膏と特殊しらすを混合材とした混合セメント

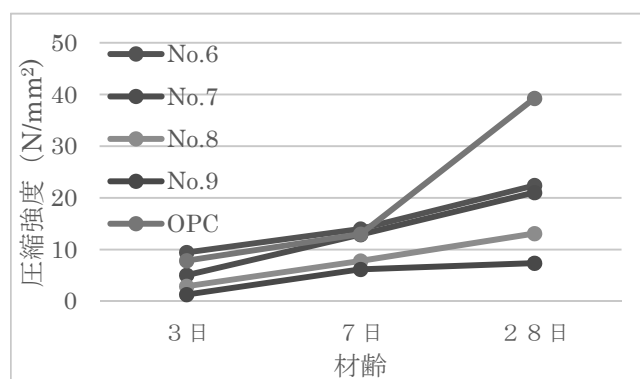


図12 混合セメント硬化体の圧縮強度

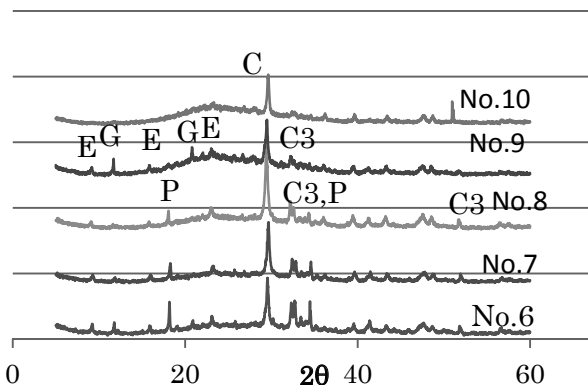


図13 混合セメント混練直後のX線回折パターン

廃石膏ボードを混合することにより強度増加を図るために表4に表3に示した混合割合と比較すると内割り5%の灰石膏を混合した割合で強度試験、X線回折による分析を行った。

図12に表4の混合割合で作製した混合セメントによる硬化体の強度試験を示す。なお、供試体は直径5cmの円形供試体である。なお、No.10はセメントと石膏量がほぼ同じのため、硬化せず、強度試験が実施

できなかった。他の供試体は図のように強度を有する硬化体となった。図に示すように強度は、No.6,7の強度は、材齢が1週間はOPCと同様であるが、材齢が28日では強度は、増加するが、OPCの強度の約半分程度である。また、No.8,9の強度はセメント量が少なくなるほど強度は低下した。しかし、No.8,9の強度は、No.3,4の強度と比較するとかなり強度は増加しており、廃石膏が混合されることにより強度は増加していると考えられる。

図13～16にNo.6～No.10の練混ぜ直後～材齢28日までのX線回折図を示す。

図に示すように No.10 は 23° のブロードなハローがもっとも大きく, CSH のピークだけ直後と 1 日にはあるが, 7 日 28 日には, そのピークはかなり小さくなる. また, No.10 は, 材齢が 28 日でも他の鉱物のピークは出現せず, 反応物質が生成されていないことが推測できる. その他の試料でも練り混ぜ直後 CSH のピークが見られる. それ以外には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークと C_3S のピークが見られる. No.1(OPC : しらす : 廃石膏 = 47.5 : 47.5 : 5) が材齢 3 日, 材齢 7 日の圧縮強度が OPC よりも大きい圧縮強度であった. しかし, その後の強度の伸びが良くなく, 材齢 28 日の圧縮強度は 22.4N/mm^2 であり, OPC との圧縮強度比は 57.1% であった. No.7, 8, 9, 10 はセメント混合量が低くなるごとに圧縮強度は小さくなる. また, この硬化体も表 2 の混合セメント硬化体と同様の理由で No.10 は強度計測が行えなかった.

図 13 に表 3 の混合セメント混練直後の X 線回折パターンを示す. $2\theta = 9.1^\circ$, 15.6° に若干ピークが検出

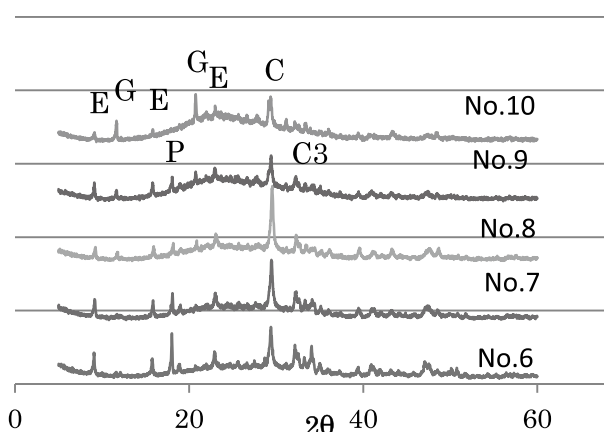


図 14 材齢 1 日の X 線回折パターン

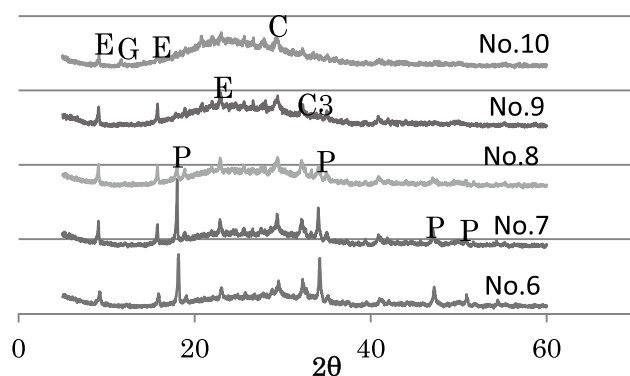


図 15 材齢 7 日 X 線回折パターン

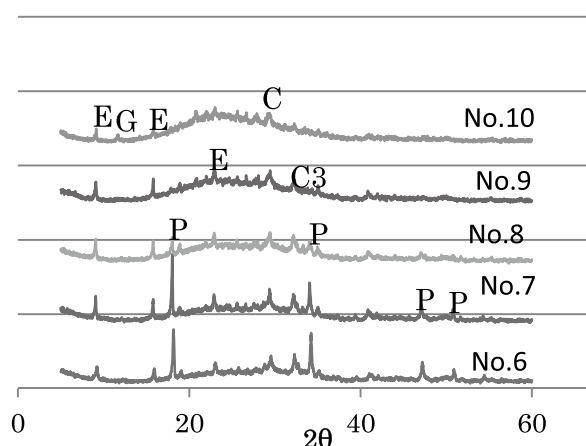


図 16 材齢 7 日 X 線回折パターン

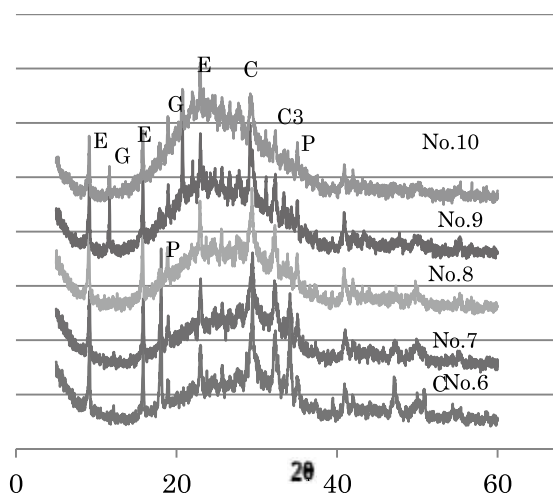


図 17 混合セメント材齢 28 日 X 線回折パターン

され, エトリンガイトが定性できた. また, $2\theta = 11.6^\circ$, 21° にピークが検出され, これは廃石膏 (半水石膏) と水が反応し二水石膏が生成されている. また, $2\theta = 29^\circ$ に CSH が定性できた. $2\theta = 32.2^\circ$, 34.4° , 51.6° には C_3S のピークも確認できる. $2\theta = 18.1^\circ$, 34.2° には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークも確認できる. そのため, $2\theta = 34^\circ$ 付近で重なって検出されている. 図中の E はエトリンガイト, G は二水石膏, P は $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C は CSH, C3 は C_3S を示している. CSH のピーク値がいずれの試料でも高いことが特徴的である. No.9 でエトリンガイトのピーク値が高いのは, しらす中に含まれるアルミナが原因とかがえられる.

図 14 に混合セメント硬化体の材齢 1 日の X 線回折パターンを示す. どの配合でも混練直後に比べ $2\theta = 9.1^\circ$, 15.6° に検出されるエトリンガイトのピークが鮮明に確認できる. $2\theta = 32.2^\circ$, 34.4° にみられる

C₃S のピークが混練直後に比べ小さく検出されている。これは、それらが水和していることに起因する。しかし、それらが水和する際に析出される Ca(OH)₂ (2θ = 18.1° , 34.2°) のピークがあまり変化しない。これは、析出された Ca(OH)₂ が特殊しらすのアルミナ成分や、廃石膏の硫黄成分と反応し、2θ = 9.1° , 15.6° にピークが検出されるエトリンガイトを生成したことや、特殊しらすの SiO₂ と反応し 2θ = 29° にピークが検出される CSH を生成したことで、増えなかったことに起因する。

図 15 は、表 3 の混合セメント硬化体材齢 3 日の X 線回折パターンである。材齢 1 日と比較すると引き続き 2θ = 32.2° , 34.4° に検出される C₃S のピークが小さくなっている。また、2θ = 11.6° , 21° に検出される二水石膏はほとんどピークが検出されず、2θ = 18.1° , 34.2° に検出される Ca(OH)₂ のピークが大きく検出されている。二水石膏は 2θ = 9.1° , 15.6° に検出されるエトリンガイトの生成のための原料となり、C₃S 水和の際に析出される Ca(OH)₂ はそのまま残り、その量は増加したと考えられる。また 2θ = 29° に検出される CSH のピークが小さく検出されているので、CSH が分解し、Ca(OH)₂ と SiO₂ となり、SiO₂ がゲル化して 2θ = 23° あたりに混練直後よりも膨らみのある波形ができていると考察できる。

図 16 に表 3 の混合セメント硬化体材齢 7 日の X 線回折パターンを示す。材齢 3 日と比較すると、No.3~No.5 の硬化体は 2θ = 9.1° , 15.6° に検出されるエトリンガイトと 2θ = 29° に検出される CSH と以外はピークが検出されず、No.6, No.7 の硬化体は検出されるピークが全体的に小さくなった。2θ = 18.1° , 34.2° の Ca(OH)₂ のピークが No.6,7,8 にあるが、No.9,10 にピークは見られない。これは水和物がなにかしらの影響で分解していると考えられる。この配合は特殊しらす、セメント、廃石膏を混合することで、表 2 の配合よりエトリンガイトを多く生成した。また、No.8~No.10 硬化体にピークあまり検出されなかった。養生 3 日で生成された水和物が分解したと考えるべきであろう。材齢 7 日 No.6, No.7 の圧縮強度は OPC よりも強度大きかった。しかし、材齢 28 日の強度は OPC と比較すると、No.6 が 57.1% の強度比となり、かなり低くなっている。No.6 の材齢 7 日の密度が 1.71g/cm³ 程度であり、強度が伸びなかった原因の可能性として炭酸化の可能性がある。

図 17 に表 3 の混合セメント硬化体材齢 28 日の X 線回折パターンを示す。材齢 7 日と比較すると、No.6~No.10 の硬化体は 2θ = 9.1° , 15.6° に検出され

るエトリンガイトと 2θ = 29° に検出される CSH のピークも検出される。

この配合は特殊しらす、セメント、廃石膏を混合することで、表 2 の配合よりエトリンガイトを多く生成した。また、No.8~No.10 硬化体にピークあまり検出されなかった。養生 3 日で生成された水和物が分解したと考えるべきであろう。材齢 7 日 No.6, No.7 の圧縮強度は OPC よりも強度大きかった。しかし、材齢 28 日の強度は OPC と比較すると、No.6 が 57.1% の強度比となり、かなり低くなっている。No.6 の材齢 7 日の密度が 1.71g/cm³ 程度であり、強度が伸びなかった原因の可能性として炭酸化の可能性がある。

本研究の結果を以下に示す。

- (1) 特殊しらす、セメントを混合した混合セメントで作製した硬化体は、セメントクリンカーの C₃S の水和により析出される Ca(OH)₂ がしらすの SiO₂ と水和反応し、CSH を生成する。OPC で生成される CSH より多くの CSH が生成される。水和反応によりエトリンガイトが生成されるが、その生成量は少なく、早期にモノサルフェート化している。石膏量が少ないためであろう。
- (2) 特殊しらす、セメント、廃石膏を混合した混合セメントで作製した硬化体は、石膏混合によりエトリンガイトを生成量が増加する。廃石膏混合量が多いとエトリンガイトは早期に生成されるが、長期的には分解し、強度増加に寄与できなくなる。
- (3) しらすとセメントを混合した混合セメントで作製した硬化体は、密度が小さいことから炭酸化が早く進む傾向があり、強度増進が小さいようである。

以上のことからしらすを混合した混合セメントで作製した硬化体は、セメント量が比較的少なくても汚泥処理用の硬化材として活用できる可能性がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、平成 24 年度卒業研究生、小野 昂輝、久木野 誠太、西島 康貴、丸山 僚太、専攻科生、中野 大樹には、多大な努力で実験、考察を行った。この場を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 佐川孝広, 混和材料を使用したコンク

リートの物性変化と性能評価研究小委員会報告書ならびにシンポジウム講演概要集，土木学会，pp.153-158，2007.

2) 宮原茂禎，混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会報告書ならびにシンポジウム講演概要集，土木学会，pp.159-165，2007.

3) H.F.W.Taylor: Cement chemistry 2nd edition, Thomas Telford Publishing, pp.187-225, 1997.

4) 小林 一輔他 3 名：“コンクリート炭酸化のメカニズム”，コンクリート工学論文集，Vol.11, No.1, pp.26-32, 1990.1

5) 松田応作，山田英夫：“石灰の炭酸化反応”，石膏と石灰. (97), 245 , pp.3-10, (1968)

6) 堤 直人，田中 誠，田崎 智晶，天田 克己：“製鋼スラグの迅速炭酸化処理技術の開発”，新日鉄技報 第 388 号 2008

7) 李 春鶴・石田 哲也：“微細空隙構造と物質平衡・移動の強連成に立脚したセメント水和生成の炭酸化反応モデル”，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, 2006
